

学校编码: 10384
学号: X200424002

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

量子布雷顿制冷循环的性能特性
及其优化分析

The Performance Characteristics and Optimal Analyses of
Quantum Brayton Refrigeration Cycles

刘静宜

指导教师姓名: 陈 金 灿 教授
专 业 名 称: 凝 聚 态 物 理
论文提交日期: 2007 年 4 月
论文答辩时间: 2007 年 月
学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2007 年 4 月

摘要

布雷顿循环是一种常见的典型循环，布雷顿热机循环被广泛应用于蒸汽动力厂和航空推进系统；布雷顿制冷循环在普冷和深冷领域得到了越来越广泛的应用。然而，温度越低，制冷工质的量子简并性越强。因此，必须考虑工质的量子特征对循环性能的影响。像其它热力学循环一样，对量子布雷顿制冷循环的研究不仅在理论研究上而且在实际应用中都是非常重要的，它将有助于低温制冷技术的发展。

本文研究以理想玻色气体和费米气体为工质的量子布雷顿制冷循环的性能特性。在第二章中介绍理想玻色气体和费米气体的热力学性质，指出了玻色气体由于存在玻色-爱因斯坦凝聚现象，一些典型的热力学循环(如 Carnot 循环、Otto 循环、Brayton 循环、Ericsson 循环、Diesel 循环和 Atkinson 循环)，循环不能跨越玻色-爱因斯坦凝聚温度点。在第三章中建立以理想玻色气体为工质的不可逆回热式量子布雷顿制冷循环模型，应用量子统计理论和理想玻色气体的热力学性质，导出制冷量、回热量、输入功和性能系数等重要参数的表达式，通过数值计算获得了循环的一些重要的性能特性曲线，分析了循环的不可逆性和回热特性对玻色布雷顿制冷性能的影响。在第四章中建立不可逆量子布雷顿制冷循环模型，研究了有限速率热传递、工质的量子简并性和内不可逆性对以理想量子气体为工质的量子不可逆布雷顿制冷循环的优化性能的综合影响，得到了循环的一些优化判据。结果表明，以理想费米气体或理想玻色气体为工质的不可逆量子布雷顿制冷循环的优化性能是不相同的。本文所得结论可对气体制冷机的优化设计提供一定的理论依据和参考，对极低温下的气体制冷机的进一步研究具有促进作用。

关键词：布雷顿制冷循环；量子气体；不可逆性

ABSTRACT

The Brayton cycle is one of the typical and familiar cycles. The Brayton engine cycle is used in the steam power plants and air propellant systems widely, while the Brayton refrigeration cycle is used in the refrigeration and cryogenic fields more and more widely. However, the lower the temperature is, the stronger the quantum degeneracy of the working substance of the cycle. Consequently, the influence of quantum characteristic of the working substance on the performance of the cycle has to be taken into account. Like other thermodynamic cycles, it is very important not only in the theoretical research but in the practical application to investigate the quantum Brayton refrigeration cycle. It will be helpful to promote the development of cryogenic refrigeration technology.

In this thesis, the performance characteristics of the quantum Brayton refrigeration cycle using an ideal Bose or Fermi gas as the working substance are researched. In chapter 2, the thermodynamic properties of an ideal Bose gas and Fermi gas are introduced. It is pointed out that due to the existence of Bose-Einstein condensation for the Bose gas, some typical thermodynamic cycles such as the Carnot, Brayton, Otto, Ericsson, Diesel and Atkinson cycles cannot be operated across the critical temperature of Bose-Einstein condensation of an ideal Bose gas. In chapter 3, an irreversible regenerative cycle model of the quantum Brayton refrigeration cycle using an ideal Bose gas as the working substance is established. Based on the theory of statistical mechanics and thermodynamic properties of an ideal Bose gas, the expressions for some important performance parameters, such as the refrigeration load, regenerative heat load, work input and coefficient of performance are derived. By using numerical calculation, several important performance characteristic curves are generated. The influence of the quantum degeneracy, irreversibility and regeneration on the performance of a Bose Brayton refrigeration cycle is analyzed. In chapter 4, an irreversible cycle model of the quantum Brayton refrigeration cycle using an ideal Bose or Fermi gas as the working substance is established. The synthesis influence of

the degeneracy of the quantum gas, the internal irreversibility of the working substance and the finite-rate heat transfer between the working substance and the heat reservoirs on the optimal performance of the cycle is investigated. Some optimum criteria of the cycle are given. The results obtained indicate that the optimal performance characteristics of the irreversible quantum Brayton refrigeration cycles using ideal Fermi or Bose gases as the working substance are different. The results obtained here will not only provide some theoretical bases and references for the optimal design and manufacture of air refrigerators but also play an important promotion role for the further investigation of ultra-low temperature air refrigerators.

Key words: Brayton refrigeration cycle; quantum gas; irreversibility

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 (), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名: 日期: 年 月 日

导师签名: 日期: 年 月 日

目 录

第一章 引言	1
§1.1 量子制冷循环的发展及研究现状	1
§1.2 本论文的研究内容和安排	3
参考文献	4
第二章 理想量子气体的热力学性质	11
§2.1 理想量子气体的内能、熵和热容量	11
§ 2.1.1 理想玻色气体的内能、熵和热容量	11
§ 2.1.2 理想费米气体的内能、熵和热容量	14
§2.2 特殊条件下的热容量	15
§ 2.2.1 强简并条件下的热容量	15
§ 2.2.2 弱简并条件下的热容量	16
§ 2.2.3 高温极限下的热容量	17
§2.3 讨论	17
§2.4 结论	22
参考文献	22
第三章 不可逆回热式玻色布雷顿制冷循环性能的分析	24
§3.1 不可逆回热式布雷顿制冷循环模型	25
§3.2 玻色布雷顿制冷循环的性能特性	27
§3.3 讨论	28
§ 3.3.1 回热的影响	28
§ 3.3.2 最大回热量时的循环性能	30
§ 3.3.3 无回热时的循环性能	31
§3.4 结论	33
参考文献	33
第四章 多种不可逆性对量子布雷顿制冷循环性能的影响	37
§4.1 不可逆量子布雷顿制冷循环模型	37

§4.2 几个重要参数的表达式.....	40
§4.3 基本优化关系.....	41
§4.4 几种特殊情况下的循环性能.....	46
§ 4.4.1 强简并条件下的循环性能.....	46
§ 4.4.2 弱简并条件下的循环性能.....	47
§ 4.4.3 高温情况下的循环性能.....	47
§ 4.4.4 内可逆循环的性能.....	47
§4.5 结论.....	48
参考文献.....	48
第五章 结束语.....	51
附 录.....	52
致 谢.....	53

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Development and investigation status of quantum refrigeration cycle.....	1
1.2 Contents and outline of the thesis.....	3
References.....	4
Chapter 2 Thermodynamic properties of the ideal quantum gases...11	11
2.1 Internal energy, entropy and heat capacity of the ideal quantum gases.11	11
2.1.1 Internal energy, entropy and heat capacity of an ideal Bose gas.....11	11
2.1.2 Internal energy, entropy and heat capacity of an ideal Fermi gas.....14	14
2.2 Heat capacity under special cases.....15	15
2.2.1 Heat capacity under strong gas degeneracy.....15	15
2.2.2 Heat capacity under weak gas degeneracy.....16	16
2.2.3 Heat capacity under high-temperature limit.....17	17
2.3 Discussion.....17	17
2.4 Conclusions.....22	22
References.....22	22
Chapter 3 Performance analysis of an irreversible regenerative Brayton refrigeration cycle working with an ideal Bose gas.....24	24
3.1 Model of an irreversible regenerative Brayton refrigeration cycle.....25	25
3.2 Performance characteristics of a Bose Brayton refrigeration cycle...27	27
3.3 Discussion.....28	28
3.3.1 Influence of regeneration..... 28	28
3.3.2 Performance of the cycle with the maximum regeneration.....30	30
3.3.3 Performance of the cycle without regeneration.....31	31
3.4 Conclusions.....33	33

References.....	33
Chapter 4 Influence of multi-irreversibilities on the performance of a Brayton refrigeration cycle working with an ideal Bose or Fermi gas.....	37
4.1 Model of an irreversible quantum Brayton refrigeration cycle.....	37
4.2 Expressions of several important parameters.....	40
4.3 A general optimal relation.....	41
4.4 Performance of the cycle under several special cases.....	46
4.4.1 Performance of the cycle under strong gas degeneracy.....	46
4.4.2 Performance of the cycle under weak gas degeneracy.....	47
4.4.3 Performance of the cycle under high-temperature	47
4.4.4 Performance of the endoreversible cycle.....	47
4.5 Conclusions.....	48
References.....	48
Chapter 5 Summary.....	51
Appendix.....	52
Acknowledgements.....	53

第一章 引言

§1.1 量子制冷循环的发展及研究现状

从上世纪八十年代以来,随着国防军事、环境、商业、医学、交通运输、能源、农业和生物、工业、科学研究、空间技术等诸多领域对低温环境的需求,低温制冷机在理论研究和实际应用中都得到了迅速的发展,不断出现新的应用。目前已研制的低温制冷机主要有^[1-11]:斯特林制冷机,是目前应用最多的一种空间机械制冷机,其制冷温度已达到液氦温区^[3];G-M(Gifford-McMahon循环)制冷机,是利用绝热放气制冷,一般由充气、冷却、膨胀、排气四个过程组成,主要技术指标有4.2K/1.5W, 4.2K/2.2W, 50K/20W, 主要以4.2K机为主^[1,4];脉管制冷机,利用高低压气体对脉管腔充放气过程而制冷,是国际上目前研究最活跃的一种制冷机,有多种型式,美国TRW公司研制的空间用脉管制冷机,65K/410mW,总功耗32W,60K/2W,35K/300mW,功耗分别为76W和82W,效率超过普通型式的斯特林制冷机,国内多级达到3.1K,处于国际领先水平^[4-5];绝热去磁制冷,约65mK;³He-⁴He稀释制冷机,约15mK;³He减压蒸发制冷,0.2K-0.3K,用于微重力下制冷系统^[3];H₂J-T吸附制冷,10K-30K;中科院低温中心研制的制冷机达到了2.6K,4.2K时的制冷量为0.6W,工作稳定,降温速度快^[6];在机械制冷机中,利用氦制冷方法的斯特林制冷机已经达到4K的低温条件^[9];1999年,荷兰爱因霍温技术大学的de Waele、许名尧等人以³He为工质利用三级脉管制冷机获得了1.78K的低温^[10];浙江大学博士生蒋宁在德国吉森大学Thummes教授的实验室以³He为工质,在一台二级脉管制冷机上取得1.18K的最低温度^[11]。目前以³He为工质的低温制冷机有望进入1K以下的低温区直到2.6mK,并且在4.2K时比⁴He给出更大的制冷量^[10]。低温制冷机的研制,促进了低温技术的发展。近年来,研究人员加强了对低温制冷循环系统的理论模型和性能特性的研究。如何改善低温制冷循环系统的性能,研究工质量子特性和多种不可逆性对循环性能的影响,优化循环系统的性能参数,是摆在人们面前的一个重要课题。量子热力学循环理论正是在这种背景下,近年来得到了广泛的重视和大力发展,从而使量子热力学循环理论成为物理与工程热物理学工作者近年来关注的研究课题之一。

量子热机循环的概念最早是贝尔电话实验室的Scovil和Schula-Dubois^[12]提出

的,他们提出了三能级微波激射器可视为热机的概念,建立了三能级微波激射器热机模型。而低温制冷循环的概念可追溯到 19 世纪^[13-14]众所周知,在低温下,循环工质的量子特性非常显著,循环的性能将不同于以理想气体为工质的循环,因此,量子热力学循环理论应运而生。

量子热力学循环不仅在理论上而且在实际应用中都是非常重要的,如在具有量子热力学特征的分子制冷机、固体材料和染料分子的激光制冷技术、无线电频率单电子制冷机和工程上的超低温气体制冷循环等领域都与此相关^[15-32]。对其性能及其优化理论的研究是物理、工程热物理和能源利用领域的基础和应用基础研究。

对量子热力学循环的研究主要从研究量子热泵和量子热机^[12, 18-19, 22, 24-28, 33-66]开始,许多学者研究了以自旋 1/2 系统为工质^[44-50]、以谐振子系统为工质^[51-54]和以理想玻色气体和费米气体为工质^[55-61]的量子热机和量子热泵循环的性能特性,一些学者研究了以辐射场为工质的光子卡诺热机^[25, 62]、电子卡诺热机^[26]、可逆和不可逆量子布朗热机^[26, 63-64]、以囚禁在宽度为L的一维无限深势阱的微观粒子为工质的量子机械卡诺热机^[41-42, 65]和量子四冲程热机^[27-28]。

研究量子制冷循环也是量子热力学循环理论的一个重要组成部分, Lin^[67]、He^[68-69]和Wu^[70]等基于量子主方程和半群逼近方法,研究以自旋系统为工质的量子埃里克森制冷循环和布雷顿制冷循环的性能特性,发现自旋量子埃里克森制冷循环不具有理想回热条件,导出性能系数、制冷率和输入功率等重要循环性能参数,确定这两类循环的最优运行区域。Lin^[71-73]和He^[74]等应用量子主方程和采用半群逼近方法,研究了以谐振子系统为工质的量子埃里克森制冷循环和布雷顿制冷循环这两种典型量子热力学循环的性能特性,发现在一般情况下谐振子量子埃里克森制冷循环不具有理想回热条件,而在高温极限下具有理想回热条件,确定了循环性能参数值的界限和循环的优化运行区域。详细分析这两种典型量子循环在高温极限下的性能特性及其优化性能,发现了这两种量子循环在高温极限下与经典循环中的结论有许多相似处,且在高温极限下谐振子系统与热源间的传热规律与经典的牛顿线性传热规律相似。

一些学者应用量子统计理论和理想玻色气体和费米气体的热力学性质,研究以理想玻色气体和费米气体为工质的量子斯特林制冷循环、量子埃里克森制冷循

环和量子布雷顿制冷循环的性能^[75-89]，分析工质的量子简并性、工质的内不可逆性和非理想回热等多种不可逆性对循环性能的影响，得出了许多有益的结论，如：含有绝热过程或等压过程的玻色热力学循环不能运行到低于玻色-爱因斯坦凝聚温度以下的温区；量子斯特林制冷循环和量子埃里克森制冷循环都不具有理想回热条件；由于受工质的量子简并性的影响，玻色布雷顿制冷循环的制冷量总是大于经典气体布雷顿制冷循环的制冷量，而费米布雷顿制冷循环的制冷量总是比相应的经典循环的小；确定布雷顿制冷循环运行的最小压强比和优化区间等。

量子布雷顿制冷循环是一个典型的热力学循环，它在普冷和深冷领域得到了越来越广泛的应用，而且对量子布雷顿制冷循环的研究还有利于航天技术和空间低温制冷技术的发展。美国的NASA与Creare公司已研究出制冷温度 4.2K-70K，制冷量 1-5W，寿命>5 年的布雷顿制冷机，而且在工程应用方面也获得了一定的成功，已将其应用到哈勃望远镜装置上^[90]。目前主要研究工质的量子简并性^[75-77]、内不可逆性^[79-80, 84-85]和回热^[81]对量子布雷顿制冷循环性能特性的影响，而研究系统与热源间的有限速率热传递对量子布雷顿制冷循环的影响还较少涉及。因此，研究包括有限速率热传递等多种不可逆性对量子布雷顿制冷循环的优化性能的综合影响是十分必要和非常有意义的。

§1.2 本论文的研究内容和安排

本论文将在已有文献的基础上进一步研究以理想量子气体为工质的不可逆量子布雷顿制冷循环的性能特性及其基本优化关系。

第二章利用理想量子气体的压强和粒子数密度，推导出描述理想量子气体热力学性质的几个重要物理量如物态方程、内能、焓、熵和热容量等的普遍表达式，讨论理想量子气体在几种特殊情况下的热容量，指出了当以理想玻色气体作为热力学循环工质时，工质的温度要高于玻色-爱因斯坦凝聚温度；对含有等压过程或绝热过程的循环不能跨越玻色-爱因斯坦凝聚温度点。第三章建立不可逆回热式玻色布雷顿制冷循环模型，利用理想玻色气体的热力学性质，研究工质的量子简并性、不可逆性和回热对以理想玻色气体为工质的布雷顿制冷循环的影响，结果表明循环的不可逆性总是使循环的性能变差；回热可能提高循环的制冷量，但以牺牲性能系数为代价，可在两者之间寻找最佳折衷；确定循环运行的最小压强

比。第四章应用现代热力学理论和量子统计理论研究受工质的量子简并性、工质内部的不可逆性和系统与热源间的有限速率热传递等多种不可逆性综合影响的不可逆量子布雷顿制冷循环的优化性能特性,推导出制冷率、性能系数和输入功率等表征性能参数的普遍表达式,利用数值计算得到最大制冷率及其相应的性能系数和输入功率,得到循环的优化特性曲线,确定性能系数和输入功率的优化界限和循环的优化运行区间,对几种有趣的情况作了详细的讨论。最后,论文指出了本领域有待进一步深入研究的一些方向。

参考文献

- [1] K. Uhlig, W. Hehn. ^3He - ^4He dilution refrigerator precooler by Gifford-McMahon refrigerator [J]. Cryogenic, 1997, 37: 279-282.
- [2] R. Bowman, J. Karlmann, S. Bard. Post-Flight analysis of a 10K sorption cryocooler [J]. Adv. Cryogenic Eng., 1998, 43: 1017-1024.
- [3] A. Graziani, G. Dall'Oglio, L. Martinis, et al.. A new generation of ^3He refrigerators [J]. Cryogenic, 2003, 43: 659-662.
- [4] G. Lu, P. Chen. On cycle-averaged pressure in a G-M type pulse tube refrigerator [J]. Cryogenic, 2002, 42: 287-293.
- [5] M. Devlin, S. Dicker, J. Klein, et al.. A high capacity completely closed-cycle 250mK ^3He refrigeration system based on a pulse tube cooler [J]. Cryogenic, 2004, 44: 611-616.
- [6] 张敏, 王如竹. 空间低温技术的新进展 [J]. 低温工程, 2000, 114(2): 1-6.
- [7] 肖福根, 刘国青, 胡朝斌. 低温技术在航天领域应用的国外发展情况 [J]. 低温工程, 2002, 129(5): 54-63.
- [8] 徐烈, 熊炜, 张涛, 徐佳梅. 氦制冷在空间制冷技术中的应用 [J]. 低温工程, 1998, 101(1): 1-6.
- [9] 陈隆智. 航天器上的氦制冷 [J]. 低温工程, 1994, 77(1): 6-10.
- [10] M. Xu, A. deWaele, Y. Ju. A pulse tube refrigerator below 2K [J]. Cryogenic, 1999, 39: 865-869.
- [11] 黄永华, 陈国邦, 李祥仪. ^3He 的低温物理特性及其应用 [J]. 低温与超导, 2004, 32: 16-21.
- [12] H. Scovil, E. Schula-Dubois. Three-level Masers as heat engines [J]. Phys. Rev. Lett., 1959, 2:

262-263.

- [13] L. Reichl. A Modern Course in Statistical Physics [M]. New York: Wiley, 1998.
- [14] F. Pobell. Matter and Methods at Low Temperatures [M]. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [15] M. Scully, et al.. Extracting work from a single heat bath via vanishing quantum coherence [J]. Science, 2003, 299: 862-864.
- [16] A. Graziani, et al.. A new generation of ^3He refrigeration [J]. Cryogenics, 2003, 43: 659-662.
- [17] A. Devlin, et al.. A high capacity completely closed-cycle 250mK He refrigeration system based on a pulse tube cooler [J]. Cryogenic, 2004, 44: 611-616.
- [18] Y. Rostovtsev, Z. Sariyanni, M. Scully. Extracting energy from a single heat bath via vanishing quantum coherence :III Master equation derivation[J]. Laser Phys., 2003, 13(3): 375-385.
- [19] M. Scully. Quantum Afterburner: Improving the efficiency of an ideal heat engine [J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 050602-1.
- [20] J. Gemmer, A. Otte, G. Mahler. Quantum approach to a derivation of the second law of thermodynamics [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 1927-1930..
- [21] M. Scully. Extracting work from a single thermal bath via quantum negentropy [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 220601-1.
- [22] E. Geva. On the irreversible performance of a quantum heat engine [J]. J. Mod. Opt., 2002, 49: 635.
- [23] C. Mungan, et al.. Laser cooling of a solid 16K starting from room temperature [J]. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 1031-1033.
- [24] T. Opatrny, M. Scully. Enhancing Otto-mobile efficiency via addition of a quantum Carnot cycle [J]. Fortschr. Phys., 2002, 57: 657
- [25] P. Milonni. Photon steam engines [J]. Physics World, 2003, 16: 22-23.
- [26] T. Humphrey, R. Newbury, R P. Taylor, H. Linke. Reversible quantum Brownian heat engines for electrons [J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 116801.
- [27] T. Feldmann, R. Kosloff. Quantum four-stroke heat engine: Thermodynamic observables in a model with intrinsic friction [J]. Phys. Rev. E, 2003, 68: 016101.
- [28] R. Kosloff, T. Feldmann, Discrete four-stroke quantum heat engine exploring the origin of

- friction [J]. Phys. Rev. E, 2002, 65: 551021.
- [29] R. Kisloff, E. Geva, J. Gordon. Quantum refrigerators in quest of the absolute zero [J]. J. Appl. Phys., 2000, 87: 8093-8097.
- [30] J. Palao, R. Kosloff, J. Gordon. Quantum thermodynamic cooling cycle [J]. Phys.Rev.E., 2001, 64: 056130.
- [31] J. Pekola, F. Giazotto, O. Saira. Radio-Frequency Single-Electron Refrigerator [J]. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 037201.
- [32] A. Clarka, N. Miller. Cooling of bulk material by electron-tunneling refrigerators [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 173508.
- [33] E. Geva, R. Kosloff. The quantum heat engine and heat pump: A reversible thermodynamic analysis of the three level amplifier [J]. J. Chem. Phys., 1996, 104: 7681-7699.
- [34] T. Feldmann, et al. Heat engine in finite time governed by master equations [J]. J. Am. Phys., 1996, 64: 485-492.
- [35] R. Kosloff. A quantum mechanical open system as a model of a heat engine [J]. J. Chem. Phys., 1984, 80: 1625-1631.
- [36] E. Geva, R. Kosloff. Three-level quantum amplifier as a heat engine: a study in finite-time thermodynamics [J]. Phys. Rev. E., 1994, 49: 3903-3918.
- [37] J. Avron, A. Elgart, G. Graf, L. Sadun. Optimal Quantum pumps [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(23): 236601.
- [38] S. Glazek. Limit cycles in quantum theories [J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89(23): 230401.
- [39] T. Kieu. The second law, Maxwell's Demon, and work derivable from quantum heat engines [J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(14): 140403.
- [40] T. Humphrey, H. Linke. Quantum, cyclic, and particle-exchange heat engines [J]. Physica E., 2005, 29: 390-398.
- [41] C. Bener, D. Brody, B. Meister. Quantum mechanical Carnot engine [J]. J. Phys. A: Math. Gen., 2000, 33: 4427-4436.
- [42] K. Bhattacharyya, S. Makhopadhyay. Comment on "Quantum mechanical Carnot engine" [J]. J. Phys. A: Math. Gen., 2001, 34: 1529-1533.
- [43] E. Geva, R. Kosloff. On the classical limit of quantum thermodynamics in finite time [J]. J. Chem. Phys., 1992, 97: 4396-4412.

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库